

Química Mineral de Leucomicrogranitos Neoproterozóicos do Domínio Rio Grande do Norte

Antonio Carlos Galindo
Fernando César Alves da Silva
Zorano Sérgio de Souza

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica,
Departamento de Geologia,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Natal RN,

galindo@geologia.ufrn.br
fernando@geologia.ufrn.br
zorano@geologia.ufrn.br

Resumo

Leucomicrogranitos relacionados ao ciclo Brasileiro são de ampla distribuição no Domínio Rio Grande do Norte da Província Borborema, nordeste do Brasil. Composicionalmente são biotita monzogranitos com SiO_2 entre 70-76%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ entre 7-10%, peraluminosas ($A/\text{CNK} > 1$), e de afinidade com rochas de associações subalcalinas/cálcio alcalinas potássicas. Neste trabalho são apresentados dados de química mineral de biotita, titanita e plagioclásio. A biotita mostra hábito placoso, coloração amarelada a esverdeada, comumente com alterações para clorita, e suas composições definem dois grupos distintos: o grupo-I com $\text{FeO} \geq 26,2\%$ e $\text{MgO} \leq 5,5\%$ composto pelas amostras dos corpos de Tourão, Caraúbas e Flores, e o grupo-II com $\text{FeO} \leq 21,5\%$ e $\text{MgO} \geq 9,1\%$ composto pelas amostras de Monte das Gameleiras, Acari e Angicos. As razões $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ são maiores para as amostras do grupo-I ($\approx 0,70$) e menores ($\approx 0,50$) para as do grupo-II, sugerindo condições de $f\text{O}_2$ de cristalização da biotita do grupo-I na transição dos tampões QFM/NNO e próximas ao NNO para as do grupo-II. Em diagramas de associações magmáticas a biotita indica caráter transicional entre séries cálcio alcalinas - peraluminosas, compatível com a afinidade subalcalina - cálcio alcalina potássica desses granitóides. A titanita ocorre principalmente como pequenos cristais idiomórficos de seções losangulares e mais raramente como finas e irregulares coroas sobre opacos. Quimicamente mostra teores moderados de Al_2O_3 (2,5% e 4,3%) compatíveis com os observados em titanita de origem magmática. O plagioclásio ocorre como cristais hipidiomórficos, alguns com fraca zonagem, apresentando moderado grau de alteração secundária. Todos os cristais analisados mostram composição no campo do oligoclásio com $\text{An}_{13-23\%}$.

Palavras-chave: Leucomicrogranitos, Química mineral, Biotita, Titanita, Plagioclásio.

Abstract

In the Borborema province, northeastern Brazil, in particular in the Rio Grande do Norte domain, leucomicrogranites related to the Brasileiro Orogeny are widespread. Compositionally these rocks are biotite monzogranites with SiO_2 content between 70-76wt% and total alkalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) ranging from 7 to 10wt%. They are peraluminous ($A/\text{CNK} > 1$), and have affinity with sub-alkaline / calc-alkaline potassic rocks. In this paper we present data of mineral chemistry of biotite, plagioclase and titanite. Biotite exhibits lamellae pattern, yellowish to greenish color and often shows alteration to chlorite. It can be classified in two distinct groups: Group I - $\text{FeO} \geq 26.2\text{wt}\%$ and $\text{MgO} \leq 5.5\text{wt}\%$ represented by biotite from Tourão, Caraúbas and Flores leucogranites; Group II - $\text{FeO} \leq 21.5\text{wt}\%$ and $\text{MgO} \geq 9.1\text{wt}\%$ including biotite from Monte das Gameleiras, Acari and Angicos leucogranites. $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ ratios from biotite of Group I (≈ 0.70) are higher than that of biotite from Group II (≈ 0.50), suggesting that Group I biotite crystallized under $f\text{O}_2$ conditions in the transition between buffers QFM/NNO, while Group II biotite crystallized around the NNO buffer. The studied biotites have compositions that are transitional between

those of biotites from granitoids of calc-alkaline and peraluminous series, compatible with sub-alkaline/calc-alkaline potassic nature of the studied granitoids. Titanite occurs mainly as small idiomorphic crystals exhibiting diamond shape sections and, more rarely, as fine irregular crowns on opaque minerals. The analyzed titanite grains show moderate Al_2O_3 (2.5-4.3wt%) contents compatible with magmatic origin. Plagioclase occurs as hipidiomorphic grains, some of them are slightly zoned, with moderate degree of secondary alteration. All analyzed crystals show composition in the field of oligoclase with $An_{13-23\%}$.

Keywords: Leucomicrogranites, Mineral chemistry, Biotite, Titanite, Plagioclase.

1. Introdução

O plutonismo granítico, associado a uma intensa trama de cisalhamento transcorrente, é uma das feições geológicas mais marcantes no âmbito da Província Borborema (Almeida et al. 1981), ocorrendo como batólitos, *stocks* e ainda diques de espessuras e comprimentos variados. Situado no extremo NE da Província Borborema, o Domínio Rio Grande do Norte (DRN) é marcado pelo desenvolvimento de zonas de cisalhamentos NE-SW, de cinemática predominantemente transcorrente dextral contemporâneas ao alojamento de corpos graníticos de idade ediacarana.

No contexto do DRN este plutonismo tem sido alvo de diferentes propostas tipológicas com base em critérios de campo, texturais, petrográficos e litogeoquímicos (Jardim de Sá et al. 1981, Jardim de Sá 1994, Nascimento et al. 2000 e 2008, Angelim et al. 2006, entre outros). Os leucomicrogranitos estudados no presente trabalho, têm sido referidos nestas diferentes propostas tipológicas como “granitos tipo G3” (Jardim de Sá et al. 1981), ou “suíte cálcio alcalina de alto potássio equigranular- CalcKEq” (Nascimento et al. 2000-2008), ou ainda como “suíte tipo Dona Inês (Angelim et al. 2006).

No geral estes leucomicrogranitos são rochas de composição monzogranítica com K-feldspato (microclina pertítica), plagioclásio oligoclásico e quartzo somando em média 85-90% modal, tendo biotita como máfico principal (variando no geral entre 2-10%), e titanita, allanita, epidoto e minerais opacos (usualmente em cristais < 0,5mm, idio-hipidiomórficos, em seções quadráticas, hexagonais ou losangulares) como

2. Petrografia e Geoquímica da Biotita

A biotita é a fase mineral ferromagnésiana mais comum em rochas ígneas plutônicas (exceto em rochas ultramáficas), notadamente em rochas graníticas, e como tal tem sido utilizada por vários autores como indicadora/marcadora da gênese e evolução do(s) magma(s) progenitores das rochas nas quais estão presentes (Nachit et al. 1985, Nachit 1986, Lalonde & Bernard 1993, Abdel-Rahman 1994, Nachit et al. 2005, entre outros).

Os dados apresentados neste trabalho são micropetrográficos/texturais e um conjunto de análises químicas pontuais em diferentes cristais, totalizando 27, dos quais 5 de Tourão, 4 de Caraúbas, 4 de Monte das Gameleiras, 5 de Acari, 4 de Flores e 5 de Angicos, com fechamento analítico (sem H_2O) $\geq 94\%$ (Tabela 1).

Nos leucomicrogranitos estudados as microtexturas indicam que a biotita é claramente primária, porém são observadas evidências de transformações tardimagmáticas e/ou alterações secundárias, tais como cloritização, mais comum,

os acessórios comuns. Raros e diminutos cristais de zircão e apatita podem estar presentes. Muscovita, clorita, carbonatos e saussurita (fino epidoto granular) podem estar presentes como fases tardias relacionadas a alteração de biotita e plagioclásio. Geoquimicamente essas rochas são essencialmente peraluminosas ($A/CNK > 1$) e bastante evoluídas, com SiO_2 predominantemente entre 70-76%, total álcalis (K_2O+Na_2O) entre 7-10% e razão $K_2O/Na_2O > 1$, o que confere a essa suíte uma afinidade com rochas de associações subalcalinas/cálcio alcalinas potássicas.

Neste trabalho são apresentadas e discutidas composições químicas de biotita, titanita e feldspato plagioclásio, provenientes de seis diferentes leucomicrogranitos do DRN (Fig. 1): i) diques associados aos granitóides Tourão, Caraúbas e Monte das Gameleiras (Galindo 1993, Antunes et al. 2000); ii) um fácies que ocorre como bolsões e *stock* associado ao granitóide Acari (Jardim de Sá 1994); iii) um grande dique (em torno de 2,0-3,0 km de comprimento e largura máxima da ordem de 300m) associado aos microgranitos da região de Angicos (Galindo et al. 2005); iv) e associados ao *stock* granítico Flores (Maia 2004, Maia et al. 2006). As análises aqui apresentadas foram realizadas por microsonda eletrônica nos laboratórios das universidades Blaise Pascal (CAMEBAX SX-100, voltagem de 15 kV, corrente de 11 nA e tempo de contagem de 10s) e Orleans (CAMECA SX-50, voltagem de 15 kV, corrente de 6 nA e tempo de contagem de 10s), na França, e em Queensland (JEOL-8200L, voltagem de 15 kV e corrente de 15nA) na Austrália.

muscovitização e oxidação, menos comuns. No geral a biotita ocorre como cristais lamelares/placosos, predominantemente hipidiomórficos e de contatos retos a serrilhados, de coloração amarela esverdeada, porém seções basais mostram coloração marrom avermelhada, e com pleocroísmo principalmente em tons de marrom/castanho. A cloritização ocorre essencialmente ao longo dos planos de clivagens, chegando em alguns casos a compor pseudomorfos. Inclusões de minerais opacos, usualmente idiomórficos e em seções quadráticas e/ou losangulares possivelmente magnetitas, além de pequenos cristais idio-hipidiomórficos de epidoto, allanita e zircão são relativamente comuns (Fig. 2).

No diagrama discriminante entre biotita primária e aquela de natureza secundária o conjunto das amostras analisadas se dispõem essencialmente no campo de “biotitas primárias” (Nachit et al. 2005) com algumas poucas amostras na transição para o campo de “biotitas primárias reequilibradas”, porém bem distantes dos valores de TiO_2 de biotitas

Figura 1
Mapa geológico simplificado do Domínio Rio Grande do Norte-DRN (modificado de Jardim de Sá 1994 e Nascimento et al., 2000-2008).

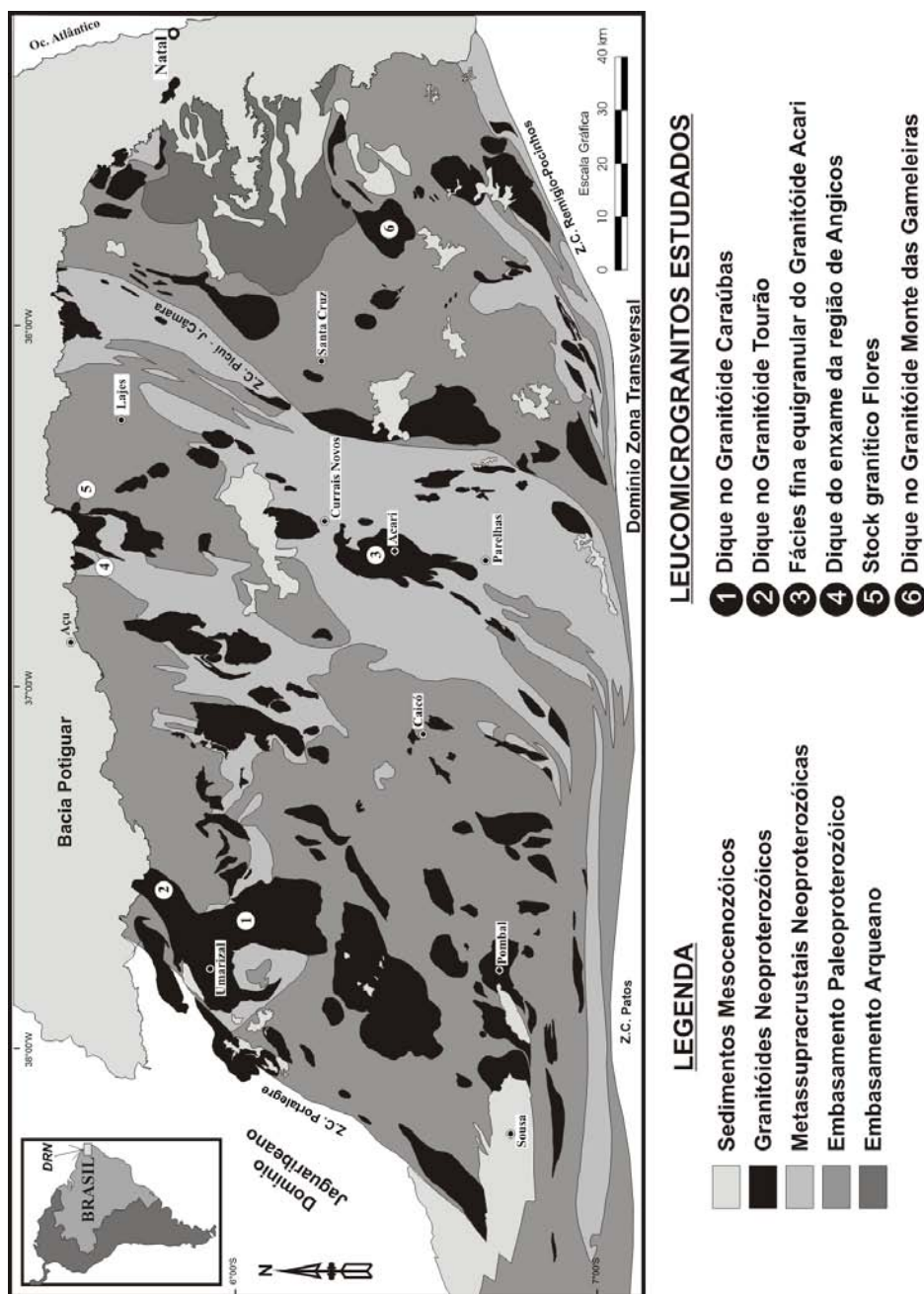
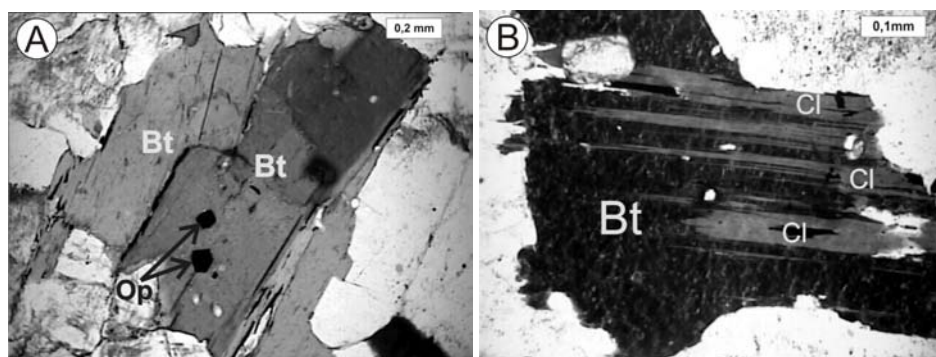


Figura 2
(A) Cristais hipidiomórficos de biotitas (Bt) fracamente alterados e com inclusões de pequenos cristais idiomórficos de opacos (Op)(magnetitas).
(B) Cristal de biotita (Bt) já com forte cloritização (Cl) ao longo dos seus planos de clivagens.



secundárias (Fig. 3A), fato este que corrobora os aspectos microtexturais anteriormente referidos.

No diagrama de classificação para biotitas, o quadrilátero “flogopita-annita-siderofilita-eastonita” (Speer 1984), as amostras analisadas mostram composições enriquecidas na molécula de annita com razões Fe/(Fe+Mg) sempre maiores do que 0,5. As amostras de Tourão, Caraúbas e Flores mos-

tram valores sensivelmente maiores (médias de 0,73 a 0,78) do que aqueles do conjunto Monte das Gameleiras, Acari e Angicos, que variam entre 0,52 (Angicos) e 0,79 (Tourão). Por outro lado, os valores de Al^{IV} no conjunto geral são em parte similares e menos discriminantes para a biotita dessas rochas, variando entre 2,17 (Monte das Gameleiras) a 2,37 (Tourão). Nota-se, entretanto, que há um sensível aumento de

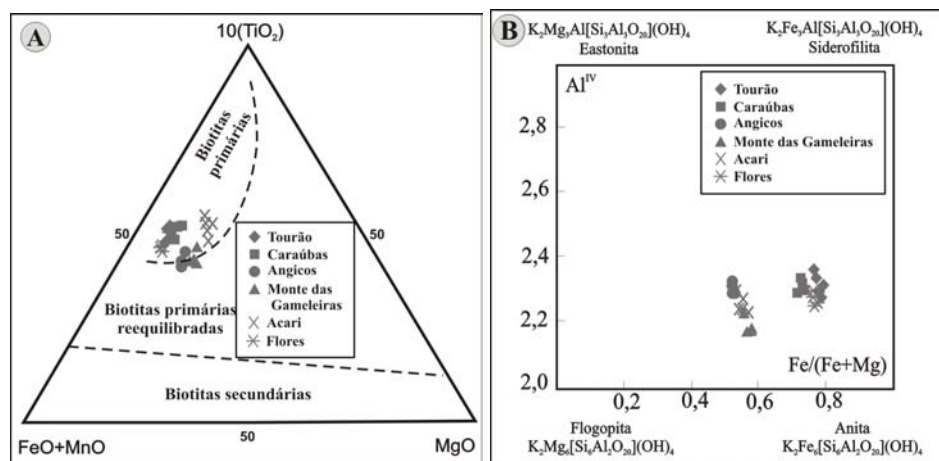
Al^{IV} para o conjunto dos granitóides Monte das Gameleiras, Acari e Angicos (valores médios de 2,19, 2,26 e 2,31, respectivamente). Para a biotita dos demais granitóides este parâme-

tro é menos sensível como discriminante, com valores médios da ordem de 2,32 para a biotita de Tourão e Caraúbas, e 2,28 para a de Flores (Tabela 1 e Fig. 3).

	Granito Tourão (T-10b)					Granito Caraúbas (C-339)					Granito Monte das Gameleiras (MG-09)					Granito Acari (AC-01)					Granito Flores (SF-11)					Granito Angicos (AP-08)							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SiO ₂	34,77	34,62	34,89	34,73	34,62	34,27	34,72	34,49	34,44	36,84	36,78	36,84	37,06	36,06	36,63	36,35	36,63	36,11	36,30	36,24	36,18	36,65	37,12	36,62	36,63	36,65	37,12	36,62	36,63	36,68			
TiO ₂	3,37	3,25	3,61	3,26	3,02	3,32	3,11	3,62	3,68	2,27	2,70	2,38	2,38	2,87	3,72	3,23	3,52	2,92	2,90	2,88	3,37	3,03	2,69	2,62	2,74	3,03	2,69	2,62	2,74	2,63			
Al ₂ O ₃	15,30	16,25	15,91	16,12	15,78	14,63	14,88	14,68	14,72	15,81	15,45	15,55	15,30	15,02	14,93	15,18	14,86	14,09	14,15	14,37	13,91	15,37	15,57	14,84	15,33	15,37	15,57	14,84	15,33	15,16			
FeO (t)	27,55	26,85	26,88	27,48	27,48	26,38	25,94	26,28	26,22	21,21	21,68	21,12	22,10	20,52	20,77	21,05	21,47	28,04	27,46	27,61	27,57	19,27	19,70	19,86	19,30	19,27	19,70	19,86	19,30	19,19			
MnO	0,56	0,47	0,57	0,45	0,43	0,37	0,29	0,41	0,45	0,30	0,29	0,26	0,33	0,54	0,70	0,58	0,75	0,49	0,51	0,48	0,40	0,30	0,21	0,23	0,18	0,30	0,21	0,23	0,18	0,42			
MgO	4,36	4,64	4,09	4,02	4,56	5,61	5,80	5,28	5,42	9,55	8,83	9,13	9,03	10,11	9,47	9,48	9,08	4,90	4,71	4,47	4,86	9,90	9,79	10,04	9,93	9,90	9,79	10,04	9,93	9,84			
CaO	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,17	0,16	0,00	0,04	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Na ₂ O	0,04	0,04	0,09	0,14	0,09	0,07	0,08	0,04	0,05	0,09	0,05	0,02	0,02	0,05	0,09	0,01	0,03	0,05	0,17	0,10	0,08	0,11	0,15	0,09	0,09	0,11	0,15	0,09	0,09	0,09			
K ₂ O	9,40	9,06	9,21	9,50	9,43	9,93	10,19	9,72	10,12	9,53	9,66	9,73	9,77	9,92	9,96	9,75	9,82	10,34	9,97	10,14	10,02	9,35	9,20	9,30	9,56	9,35	9,20	9,30	9,56	9,58			
Total	95,35	95,22	95,26	95,88	95,44	94,61	95,03	94,62	95,10	95,60	95,62	95,26	95,98	95,14	96,36	95,63	96,20	96,93	96,17	96,29	96,38	93,97	94,44	93,60	93,74	93,97	94,44	93,60	93,74	93,59			
Si	5,703	5,635	5,719	5,683	5,659	5,659	5,706	5,698	5,676	5,769	5,814	5,828	5,822	5,697	5,756	5,725	5,766	5,700	5,746	5,736	5,718	5,670	5,707	5,706	5,685	5,670	5,707	5,706	5,685	5,707			
Ti	0,416	0,398	0,445	0,402	0,371	0,413	0,385	0,450	0,456	0,267	0,320	0,283	0,281	0,340	0,440	0,383	0,416	0,347	0,345	0,343	0,401	0,353	0,311	0,307	0,319	0,353	0,311	0,307	0,319	0,308			
Al(t)	2,958	3,118	3,073	3,109	3,039	2,848	2,882	2,857	2,859	2,918	2,878	2,899	2,833	2,798	2,764	2,818	2,756	2,621	2,640	2,681	2,591	2,802	2,822	2,725	2,805	2,802	2,822	2,725	2,805	2,779			
Al ^(iv)	2,298	2,366	2,280	2,318	2,340	2,340	2,294	2,302	2,324	2,232	2,186	2,172	2,178	2,302	2,244	2,276	2,234	2,300	2,254	2,264	2,282	2,330	2,293	2,294	2,315	2,330	2,293	2,294	2,315	2,293			
Al ^(vi)	0,662	0,752	0,792	0,792	0,698	0,508	0,588	0,554	0,534	0,688	0,692	0,728	0,656	0,494	0,520	0,542	0,522	0,321	0,385	0,417	0,309	0,471	0,529	0,431	0,490	0,471	0,529	0,431	0,490	0,487			
Fe(t)	3,779	3,655	3,684	3,761	3,756	3,643	3,565	3,630	3,613	2,777	2,867	2,794	2,903	2,710	2,729	2,772	2,827	3,701	3,634	3,654	3,644	2,493	2,533	2,588	2,505	2,493	2,533	2,588	2,505	2,497			
Mn	0,078	0,065	0,079	0,062	0,060	0,051	0,040	0,057	0,063	0,040	0,039	0,035	0,044	0,073	0,093	0,077	0,100	0,066	0,068	0,064	0,054	0,039	0,027	0,030	0,023	0,039	0,027	0,030	0,023	0,055			
Mg	1,065	1,126	0,998	0,981	1,111	1,380	1,421	1,299	1,333	2,229	2,081	2,154	2,115	2,382	2,218	2,226	2,130	1,153	1,111	1,055	1,145	2,283	2,244	2,331	2,297	2,283	2,244	2,331	2,297	2,284			
Ca	0,000	0,000	0,000	0,027	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,028	0,027	0,000	0,007	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
Na	0,012	0,014	0,029	0,045	0,029	0,021	0,025	0,014	0,015	0,028	0,017	0,007	0,005	0,017	0,026	0,002	0,009	0,015	0,052	0,031	0,025	0,031	0,046	0,028	0,026	0,031	0,046	0,028	0,026	0,028			
K	1,966	1,882	1,926	1,983	1,967	2,092	2,137	2,048	2,128	1,904	1,949	1,963	1,958	1,999	1,996	1,959	1,973	2,082	2,013	2,047	2,020	1,845	1,805	1,849	1,892	1,845	1,805	1,849	1,892	1,902			
Fe/(Fe+Mg)	0,78	0,76	0,79	0,79	0,77	0,73	0,71	0,74	0,73	0,55	0,58	0,56	0,58	0,53	0,55	0,55	0,57	0,76	0,77	0,78	0,76	0,52	0,53	0,53	0,52	0,52	0,53	0,53	0,52	0,52			

Tabela 1
Composições das biotitas dos leucomicrobrantitos estudados (fórmula estrutural calculada com base em 22 oxigênios).

Figura 3
Dados da biotita dos diversos corpos plutônicos estudados: (A) diagrama discriminante entre biotita primária e secundária (Nachit et al. 2005) e (B) quadrilátero de classificação para biotita (Speer 1984).



As composições das biotitas analisadas foram projetadas nos diagramas propostos por Abdel-Rahman (1994) e Nachit et al. (1985), usados como discriminantes/indicadores de série/associações magmática. Nos diagramas que correlacionam Al_2O_3 vs. FeO^* , Al_2O_3 vs. MgO e MgO vs. FeO^* as amostras analisadas definem dois grupos bem distintos: Acari, Monte das Gameleiras e Angicos plotam no campo relativo aos granitos cálcio alcalinos, enquanto que as amostras de Tourão, Caraúbas e Flores se dispõem no campo dos granitos peraluminosos (Fig. 4). Os cristais de biotita do granito Flores mostram composição tendendo a transicionar para o campo dos granitos alcalinos (Fig. 4). Quando projetadas no diagrama Al^T vs. Mg (diagrama de Nachit et al. 1985) as composições das biotitas do conjunto Acari, Monte das Gameleiras e Angicos caem no campo dos granitos cálcio alcalinos, enquanto as biotitas dos granitos Tourão, Caraúbas e Flores mostram composições variadas principalmente em relação ao conteúdo de Al^T que é consideravelmente menor na biotita de Flores e maior, e com valores similares, nas amostras de Tourão e Caraúbas. Desta forma, esses dois últimos transicionam

entre os campos de granitos cálcio alcalinos/subalcalinos, enquanto que o pluton Flores situa-se no limite subalcalino/alcalino (Fig. 4).

O que chama atenção nas composições químicas das biotitas aqui estudadas é o fato de que em todos os diagramas geoquímicos aqui utilizados o conjunto de análises define dois grupos quimicamente distintos: o grupo-I composto pelas amostras provenientes dos granitóides Tourão, Caraúbas e Flores, e o grupo-II representando pelas amostras de Monte das Gameleiras, Acari e Angicos. O contraste entre os dois grupos é evidenciado essencialmente pelos teores de FeO e MgO . Os teores de Al_2O_3 são no geral bastante similares para todos os cristais de biotita analisados. Na biotita do primeiro grupo os teores de FeO (entre 26,21-27,67%) são maiores do que na do segundo (entre 19,47-21,53%), e conseqüentemente os de MgO são menores (valores médios entre 4,33-5,53% e 9,14-9,90%, respectivamente). Isso explica as maiores razões $Fe/(Fe+Mg)$ para a biotita do grupo-I e menores para àquela do grupo-II, enquanto que os valores médios para Al_2O_3 se situam entre 14,13 e 15,87% (vide Tabela 1).

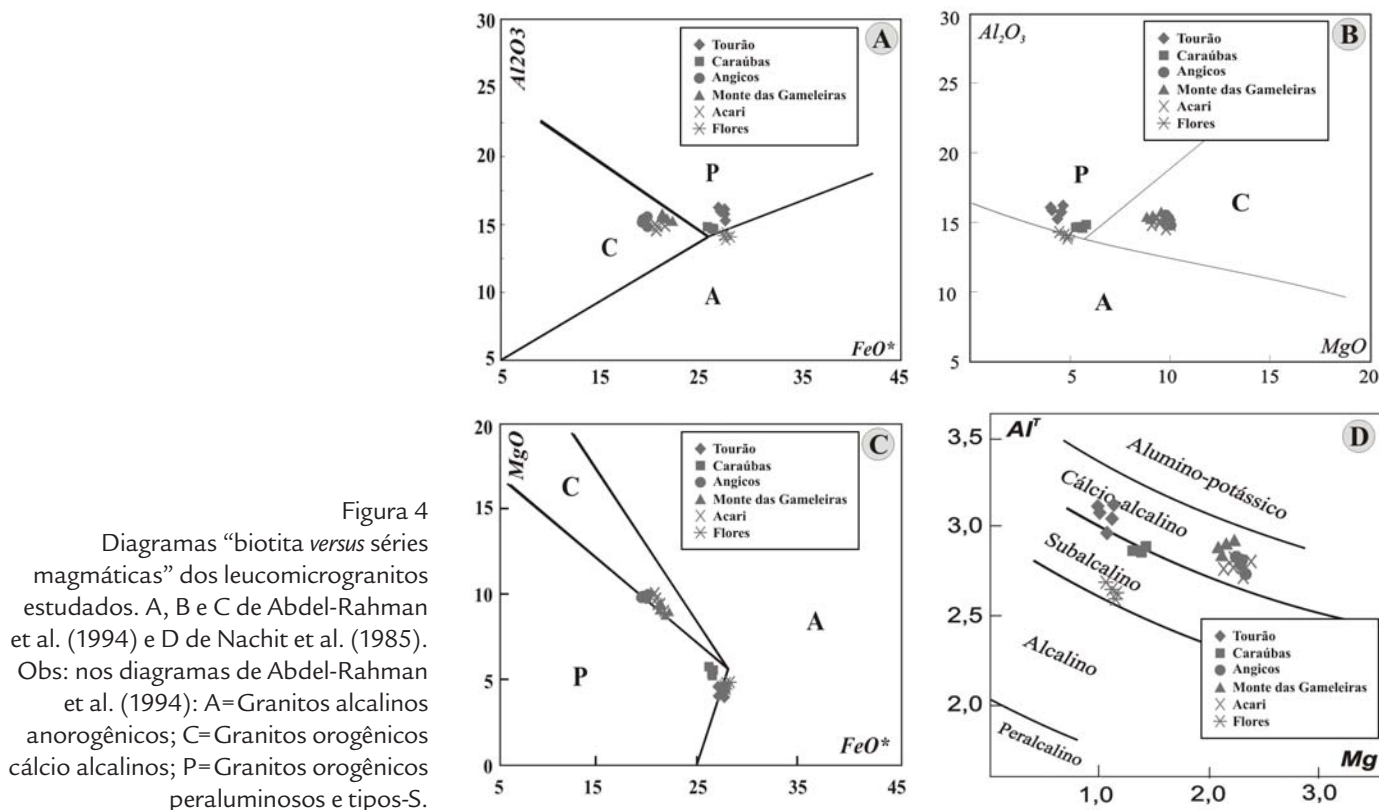


Figura 4
Diagramas “biotita versus séries magmáticas” dos leucomicrogranitos estudados. A, B e C de Abdel-Rahman et al. (1994) e D de Nachit et al. (1985). Obs: nos diagramas de Abdel-Rahman et al. (1994): A=Granitos alcalinos anorogênicos; C=Granitos orogênicos cálcio alcalinos; P=Granitos orogênicos peraluminosos e tipos-S.

3. Petrografia e Geoquímica da Titanita

O amplo campo de estabilidade da titanita faz com que este mineral seja um acessório muito comum em variados tipos de rochas ígneas, notadamente naquelas de composição granítica. Nos diferentes leucomicrogranitos aqui estudados, titanita está presente e mostra características petrográficas similares. Ocorre como pequenos cristais, essencialmente menores do que 1,0 mm, idiomórficos a hipidiomórficos, tipicamente magmáticos, principalmente em seções losangulares, de coloração creme a marrom claro, mais raramente, levemente avermelhados, fracamente pleocróicos, alguns apresentando geminação lamelar (Fig. 5). Comumente são observadas fraturas com o desenvolvimento de alterações secundárias de cor escura, possivelmente óxi-

dos e/ou hidróxidos. Mais raramente ocorre como finas e irregulares coroas sobre alguns cristais de minerais opacos, caracterizando processos secundários de esfenitização dos minerais opacos.

Apesar de presente em todos os leucomicrogranitos estudados, dispõe-se de análises pontuais apenas de cristais dos leucomicrogranitos de Caraúbas, uma análise, e Acari, duas análises (Tabela 2). Quimicamente a titanita tem teores moderados, porém distintos, de Al_2O_3 , da ordem de 2,45% para Acari e de 4,32% para Caraúbas, porém os teores de titânio e cálcio são bastante similares na titanita de ambos os granitóides (32,52-32,77% para TiO_2 e 27,98-26,02 para CaO, em Acari e Caraúbas, respectivamente).

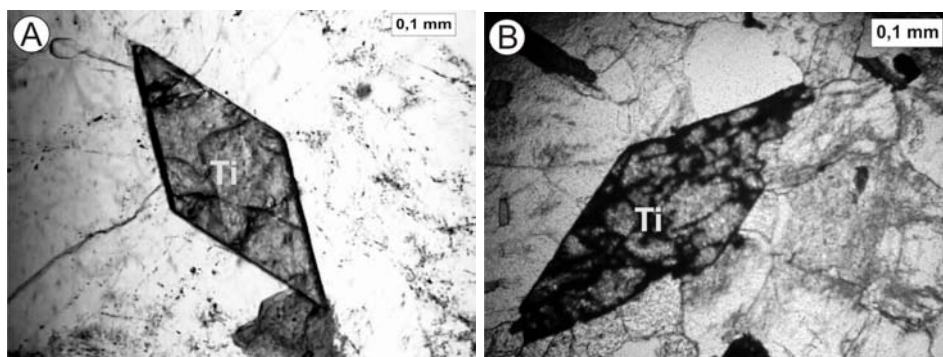


Figura 5
Aspecto microscópico da titanita.
(A) cristal idiomórfico em seção losangular.
(B) Cristal hipidiomórfico com fraturas preenchidas por material secundário (óxido/hidróxido).

4. Petrografia e Geoquímica do Plagioclásio

O plagioclásio ocorre como cristais hipidiomórficos com tamanho inferior a 2,0mm (mais raramente chegam a 3,0mm). Exibem geminação polissintética bem definida, alguns com fraca zonação apresentando finas e irregulares bordas albíticas. Apresenta, na sua porção central, moderado grau de alteração secundária, principalmente saussuritização (fino epidoto granular), além de carbonato e finos cristais lamelares de mica branca. Alguns cristais podem ainda apresentar deformação mecânica com os planos de maclas vergados e/ou falhados. Ocorrem também como pequenos cristais, usualmente menores do que 1,0mm, idiomórficos, zonados e

parcialmente alterados, inclusos em cristais maiores de microclinas pertíticas (Fig. 6).

Foi analisado apenas plagioclásio do arcabouço geral das rochas, o dominante, e não aquele de inclusões em K-feldspato. Composicionalmente o plagioclásio é essencialmente oligoclásico com pequenas diferenças: em Flores e Monte das Gameleiras ele é mais sódico com $An_{10-13\%}$; os de Angicos e Acari são ligeiramente mais cálcicos com $An_{19-23\%}$; enquanto que os de Tourão e Caraúbas são mais variados, refletindo pequena zonação, com $An_{10-20\%}$ e $An_{14-28\%}$, respectivamente (Fig. 7 e Tabela 2).

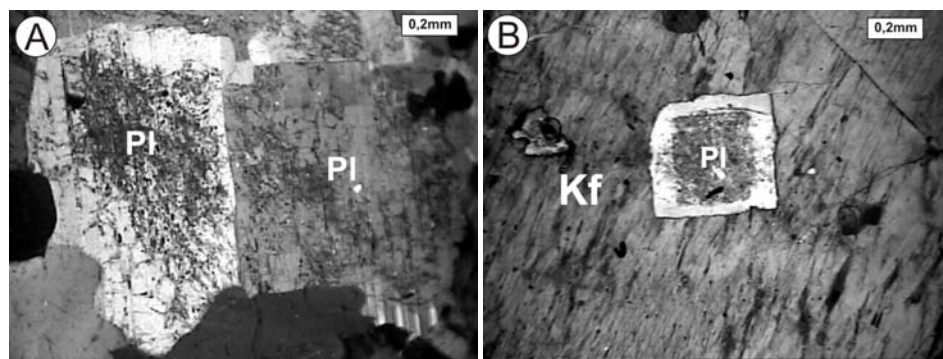


Figura 6
(A) Cristais hipidiomórficos de plagioclásios (Pl) parcialmente alterados e com o da direita mostrando irregular borda albítica (canto inferior direito da foto).
(B) Cristal idiomórfico zonado e alterado (Pl) incluído em K-feldspato pertítico.

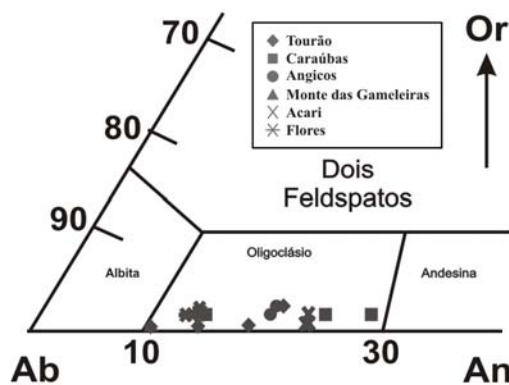
5. Discussões

As microtexturas e a composição da biotita estudada indicam que esse mineral tem uma origem tipicamente primária, porém a presença relativamente comum de processos tardios de cloritização e/ou muscovitização (Figs. 2 e 3), sugere reequilíbrio químico pós-cristalização, o que pode explicar o

fato de que em alguns leucomicrogranitos, a biotita apresente composição na transição dos campos de biotita primária-biotita secundária no diagrama de Nachit et al. (2005).

Os diagramas de Abdel-Rahman (1994) aqui utilizados mostram no geral dois conjuntos distintos de biotitas, um de

Figura 7
Diagrama Ab-Na-Or com as composições do plagioclásio dos leucomicrogranitos estudados, caracterizando-os como oligoclásios.



afinidade cálcio alcalina agrupando os leucomicrogranitos de Acari, Monte das Gameleiras e Angicos, e um segundo conjunto de afinidade peraluminosa com as amostras de Tourão e Caraúbas. Por outro lado, as biotitas de Flores tendem sempre a mostrar um comportamento mais próximo daquelas de associações alcalinas. Observa-se ainda que as razões $FeO(t)/MgO$ aumentam no sentido das biotitas de afinidade cálcio alcalina-C, dos granitos Monte das Gameleiras, Acari e Angicos com média de 2,17, para as de afinidade peraluminosa-P, Tourão+Caraúbas com média de 5,51, e para as de afinidade alcalina-A, granitos de Flores com média de 5,84. Já no diagrama de Nachit et al. (1985) observa-se que as biotitas estudadas tendem a transicionar entre os campos de granitos cálcio alcalinos/subalcalinos (granitos Tourão, Caraúbas, Monte das Gameleiras, Acari e Angicos), enquanto que as do granito Flores ficam na transição de granitos subalcalinos a alcalinos (Fig. 4).

Abdel-Rahman (1994) definiu: 1) biotita típica de granitos orogênicos tipo-I (de afinidade cálcio alcalinas-C); 2) biotita de granitos anorogênicos alcalinos (de afinidade alcalinas-A); e 3) biotita de granitos peraluminosos, incluindo os típicos tipo-S (de afinidade peraluminosa-P). A biotita dos leucomicrogranitos estudados mostram no geral geoquímica semelhante a biotita das rochas de associações cálcio alcalinas de alto potássio/subalcalinas, de caráter peraluminoso (porém não granitos tipo S), conforme já apresentado por Nascimento et al. (2000 e 2008). Assim, o aspecto transicional cálcio alcalino/peraluminoso apresentando pelas biotitas estudadas está em consonância com a geoquímica de suas rochas (magmas) hospedeiras. O mesmo pode-se dizer no diagrama tipológico de Nachit et al. (1985) (Fig. 4), onde as composições das biotitas estudadas se posicionam na zona de transição entre os granitos cálcio alcalinos/subalcalinos. Ressaltamos também, que o comportamento da biotita de Flores, na transição peraluminoso/alcalino ou subalcalino/alcalino (Figuras 3 e 4), está em consonância com a geoquímica de suas rochas (magmas), que mostram comportamento similar e afinidade com granitos intraplacas (Galindo et al. 2009).

Razões $Fe/(Fe+Mg)$ em biotitas são usadas como indicativas das condições de fugacidade de oxigênio durante a cristalização (vide Wones & Eugster 1965, por exemplo). No caso específico da biotita dos leucomicrogranitos, essa razão é relativamente alta com valores na faixa de 0,52-0,78. Comparando essas razões com aquelas encontradas na biotita dos granitos Bishop e Hepburn (Lalonde & Bernard 1993) sugere-se condições de fugacidade de oxigênio na transição dos tampões QFM/NNO para a biotita dos granitos Tourão, Caraúbas e Flores (valores de $Fe/Fe+Mg \geq 0,70$, similares ao

granito Hepburn), enquanto que a biotita dos granitos Acari, Monte das Gameleiras e Angicos seriam mais próximas do tampão NNO (valores de $Fe/Fe+Mg \geq 0,50$, similares ao granito Bishop), ou seja condições mais oxidantes, com valores de $\log fO_2 \approx -14$ a -15 . Isto está em consonância com a presença da paragênese titanita+magnetita+quartzo, em equilíbrio, nos leucogranitos, a qual reflete condições relativamente elevada de fugacidade de oxigênio (Wones 1989). Em ambos os casos estas razões e/ou fugacidade de oxigênio indicadas, apontam para uma fonte tipicamente crustal para os magmas que deram origem a esses granitos (vide Lalonde & Bernard 1993). Adicionalmente, os valores de Al^I encontrados na biotita dos leucomicrogranitos aqui estudadas são também similares aqueles encontrados na biotita dos granitos Bishop e Hepburn, sempre $\geq 2,5$.

Os cristais de titanita analisados dos leucomicrogranitos mostram teores moderados e distintos de Al_2O_3 , da ordem de 2,45% para Acari e 4,32% para Caraúbas, que são típicos de titanitas magmáticas. Titanita secundária apresenta no geral valores de Al_2O_3 bem mais elevados, usualmente acima de 6,0% (Tulloch 1979). Da mesma forma, os valores de “ $Al+Fe^{3+}$ (p.f.u)” são também compatíveis com os apresentados por titanita magmática em rochas graníticas (Enami et al. 1993), da ordem de 0,21 para a titanita de Caraúbas e 0,12-0,14 para a de Acari (Tabela 2). A razão $Al(t)/Fe(t)$ nas titanitas estudadas variam de 0,3 a 0,6. Estas razões são bem distintas das razões de titanitas de rochas metamórficas pelíticas e/ou eclogíticas e a de experimentos em altas P e T, as quais são bem mais baixas, e diferentes de titanita de rochas vulcânicas que se situam em torno de 1,0 (Nakada 1991). Titanita magmática é estável em magmas silicosos a baixas temperaturas, relativamente saturados em água e oxidados (Nakada 1991), semelhante aos leucomicrogranitos estudados (conforme mostra a presença de biotita como fase máfica dominante e magnetita como principal mineral opaco).

Alguns trabalhos (Nakada 1991, Enami et al. 1993) têm mostrado que existe uma relação direta entre o teor de Al em titanitas e a pressão de cristalização (sem especificar valores), maiores teores de Al implicaria em maior pressão de cristalização, e dessa forma pode-se inferir então que a titanita de Caraúbas se cristalizou em pressões mais elevadas que a titanita do granito Acari. Este fato é comprovado pelos dados barométricos obtidos por Galindo et al. (1995) e Galindo et al. (2000) para os batólitos de Caraúbas e Acari que indicam pressões de cristalização da ordem de 7,0 kbar e 6,0 kbar respectivamente.

Dados experimentais realizados com pressão entre 7,5 e 30 kbars (Green & Pearson 1986) mostram que em condições de pressão constante, os teores de TiO_2 de rochas portado-

ras de titanita diminuem com a temperatura e o aumento do teor em SiO₂, sendo este efeito mais forte para teores de SiO₂ inferiores a 60%. A titanita dos leucomicrogranitos aqui estudados mostra no geral TiO₂ entre 0,1 – 0,4% para teores de SiO₂ entre 68-75% (Antunes et al. 2000, Galindo 1993, Galindo et al. 2005-2009, Nascimento et al. 2000-2008), e especificamente os corpos de Acari e Caraúbas mostram TiO₂ variando entre 0,1 e 0,2% para teores de SiO₂ entre 72-73%. Estes valores quando comparados com as isotermas do dia-

grama SiO₂-TiO₂ de Green & Pearson (1986), para pressão constante de 7,5 kbars, indicam temperatura bem inferior a isoterma de 900°C (Fig. 8).

As feições texturais de finas e irregulares coroas de titanita sobre alguns cristais de minerais opacos estão associadas a reações de hidratação tardia em condições de alta fH₂O (Harlov et al. 2006), sendo ainda provavelmente responsável pela presença de óxidos/hidróxidos ao longo de planos de fraturas em alguns cristais de titanita (Fig. 5B).

	Titanitas (5 oxigênios)						Plagioclásios (8 oxigênios)														
	C-339		AC-01		T-10b		C-339			MG-09		AC-01			SF-11			AP-08a			
	1	2	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3	4	1	2	
SiO ₂	29,56	29,67	29,83	63,69	62,69	64,32	64,90	61,61	59,63	63,28	58,95	67,52	62,74	62,45	61,95	68,08	68,89	68,16	68,49	61,26	61,04
TiO ₂	32,52	32,64	32,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Al ₂ O ₃	4,32	2,51	2,39	23,08	23,35	21,37	22,47	23,95	24,15	21,85	26,48	19,95	23,76	23,72	24,14	20,61	20,95	21,06	21,00	22,72	22,66
FeO(t)	1,62	2,03	2,06	0,05	0,05	0,03	0,01	0,09	0,16	0,06	0,00	0,19	0,05	0,10	0,14	0,06	0,06	0,07	0,36	0,00	0,06
MnO	0,17	0,31	0,15	0,00	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	0,03	0,00	0,05	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,00	0,01
CaO	27,98	25,64	26,40	3,78	4,28	1,96	2,80	5,25	5,99	2,77	1,62	0,00	4,88	4,77	4,64	2,76	2,81	2,86	2,55	3,66	3,80
Na ₂ O	0,03	0,03	0,05	9,72	9,23	10,37	9,76	8,97	8,37	9,57	8,36	9,80	8,92	8,70	8,76	10,47	10,08	10,31	10,14	8,63	8,48
K ₂ O	0,04	0,00	0,38	0,00	0,35	0,02	0,02	0,16	0,20	0,17	0,03	2,33	0,00	0,16	0,00	0,28	0,31	0,23	0,11	0,25	0,26
H ₂ O	0,98	0,55	0,72	100,34	100,00	98,11	99,99	100,08	98,52	97,73	95,57	99,83	100,35	99,92	99,71	102,48	103,18	102,70	102,93	96,56	96,31
Total	97,45	93,49	95,13	2,797	2,768	2,876	2,863	2,722	2,682	2,852	2,709	2,982	2,768	2,771	2,752	2,928	2,933	2,919	2,928	2,798	2,796
Si	0,977	1,026	1,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,013	0,000	0,002
Ti	0,808	0,849	0,842	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al(t)	0,168	0,102	0,096	1,194	1,216	1,126	1,168	1,247	1,280	1,161	1,434	1,039	1,236	1,240	1,264	1,045	1,051	1,063	1,058	1,223	1,223
Al ^(iv)	0,023	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,001	0,003	0,006	0,002	0,000	0,007	0,002	0,004	0,005	0,002	0,002	0,003	0,013	0,000	0,002
Al ^(vi)	0,145	0,102	0,096	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe(t)	0,220	0,350	0,180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ⁺³	0,045	0,022	0,047	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ⁺²	0,000	0,037	0,011	0,001	0,000	0,002	0,000	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,005	0,009	0,004	0,178	0,203	0,094	0,132	0,248	0,289	0,134	0,080	0,000	0,231	0,227	0,221	0,127	0,128	0,131	0,117	0,179	0,187
Mg	0,002	0,002	0,002	0,828	0,791	0,899	0,835	0,768	0,730	0,837	0,745	0,839	0,763	0,748	0,754	0,873	0,832	0,856	0,841	0,764	0,753
Ca	0,991	0,951	0,962	0,000	0,020	0,001	0,001	0,009	0,011	0,010	0,002	0,131	0,000	0,009	0,000	0,015	0,017	0,012	0,006	0,015	0,015
Na	0,002	0,000	0,017	18	20	10	14	24	28	14	10	0	23	23	23	13	13	13	12	19	19
K	0,002	0,126	0,164	82	78	90	86	75	71	85	90	87	77	76	77	86	85	86	87	80	79
H	0,217			0	2	0	0	1	1	1	0	14	0	1	0	1	2	1	1	1	2
An				0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Ab				0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Or				0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Tabela 2
Composições de titanita e plagioclásio dos leucomicrogranitos estudados.

O plagioclásio, como já referido anteriormente, é essencialmente oligoclásico com $An_{10-28\%}$ (Tabela 2). Excetuando-se os cristais do granito Monte das Gameleiras, com apenas uma análise ($An_{10}-Ab_{90}-Or_{0\%}$), os cristais de plagioclásio do granito Flores são mais sódicos e bem homogêneos ($An_{12-13\%}$), e deve refletir o caráter mais alcalino de sua rocha hospedeira. Da mesma forma, o plagioclásio de Angicos e Acari é bem homogêneo, porém com composição intermediária (oligoclásio sódico/oligoclásio cálcico) com

$An_{19\%}$ e $An_{23\%}$ respectivamente. Por outro lado, os plagioclásios dos granitos Tourão e Caraúbas são composicionalmente mais variados com teores de $An_{10-20\%}$ e $An_{14-28\%}$, respectivamente. O plagioclásio analisado é compatível com a geoquímica global de suas rochas fontes, as quais mostram afinidade cálcio alcalina de alto potássio (plagioclásio de associações cálcio alcalinas típicas tendem a serem mais enriquecidos em CaO e com composições na transição oligoclásio cálcico-andesina).

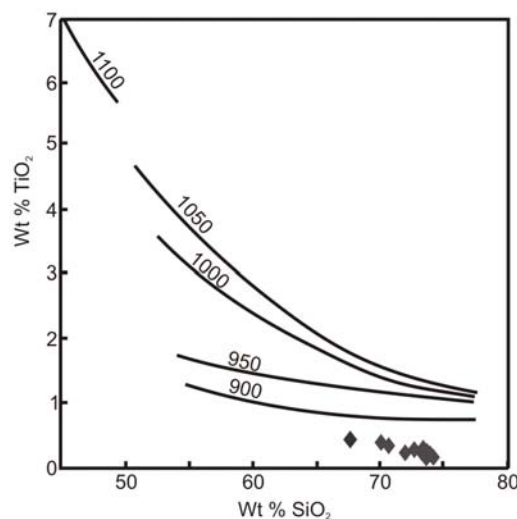


Figura 8
Diagrama de Green Pearson (1986)
para os leucomicrogranitos
portadores de titanita estudados.

6. Considerações Finais

A química mineral de biotita, titanita e plagioclásio de alguns leucomicrogranitos do DRN permite concluir que:

- i) A composição de biotita, da titanita e do plagioclásio mostra claramente uma correlação direta com a geoquímica de seus granitóides hospedeiros, ou seja, granitos tipicamente peraluminosos e de afinidade com associações cálcio alcalina de alto potássio.
- ii) A composição da biotita define dois conjuntos distintos de leucomicrogranitos separados principalmente pelas razões Fe/Fe+Mg, e teores de Al(t). Isto é coerente com o fato de

que a geoquímica dos leucomicrogranitos do DRN mostra claramente tipos bem distintos, alguns mais próximos de afinidade com rochas de associações alcalinas e outros de cálcio alcalinas.

- iii) Com base nas composições desses minerais pode-se ainda inferir que os leucomicrogranitos estudados cristalizaram sob condições de fugacidade de oxigênio moderada a elevada, sempre acima do tampão QFM, mas abaixo do HM, o que é coerente com a presença nesses leucomicrogranitos da paragéneses primária “titanita+magnetita+quartzito”.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao(s) revisor(es) da *Geochimica Brasiliensis* pela presteza e análises, e pelas críticas e sugestões ao artigo em tela, agradecem ainda à CAPES pela oportunidade de Pós-Doutorado na Universidade Blaise

Pascal (Antonio C. Galindo) e Universidade de Queensland (Zorano S. Souza), e Fernando Cesar A. da Silva agradece ao Projeto CAPESCOFECUB.

8. Referências

- Abdel-Rahman, A.M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *J. Petrol.*, 35: 525-541.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B.; Fuck, R. A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, Amsterdam: Elsevier, v. 17, n. 1/2, p. 1-29.
- Antunes, A.F.; Galindo, A.C.; Alves da Silva, F.C.; Jardim de Sá, E.F.; Lima, R.F.S. 2000. Província Borborema (NE do Brasil): o exemplo do Plúton Monte das Gameleiras. *Geochimica Brasiliensis*, 14(1):51-69.
- Enami, M.; Suzuki, K.; Liou, J.G.; Bird, D.K. 1993. Al-Fe³⁺ and F-OH substitution in titanite and constraints on their P-T dependence. *Eur. J. Mineral.*, vol.5:219-231.
- Galindo, A.C. 1993. Petrologia dos granitóides brasileiros da região de Caraúbas Umarizal, oeste do Rio Grande do Norte. Tese de Doutorado, Centro de Geociências-UFFPA. 370p.

- Galindo, A.C.; Alves da Silva, F.C.; Plácido Jr., J.S.; Cavalcante, R.; Jardim de Sá, E.F. 2005 Diques Micrograníticos da Região de Angicos (RN): Aspectos Geológicos, Petrográficos e Litogeoquímicos. *In: SBG, XXI Simpósio de Geologia do Nordeste*, Atas, Recife-PE. p147-149.
- Galindo, A.C.; Souza, Z.S.; Alves da Silva, F.C.; Fambrini, S.M.C.M. 2009 Litogeoquímica do stock granítico Flores, porção centro norte do Domínio Seridó da Província Borborema. *In: XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Atas, Fortaleza-CE. p108.
- Green, T.H.; Pearson, N.J. 1986. Ti-rich accessory phase saturation in hydrous mafic-felsic compositions at high P,T. *Chemical Geology*, 54:185-201.
- Harlov, D.; Tropper, P.; Seifert, W.; Nijland, T.; Forster, H-J. 2006. Formation of Al-rich (CaTiSiO₄O-CaAlSiO₄OH) reaction rims on ilmenite in metamorphic rocks as function of fH_2O and fO_2 . *Lithos*, 88:72-84.
- Jardim de Sá, E.F.; Legrand, J.M.; McCreath, I. 1981. "Estratigrafia" de rochas granitoides na região do Seridó (RN-PB) com base em critérios estruturais. *Rev. Bras. Geoc.*, 11: 50-57.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803p.
- Lalonde, A.E. & Bernard, P. 1993. Composition and color of biotites from granites: two useful properties in the characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay orogen, northwest territories. *Canadian Mineralogist*, vol.31:203-217.
- Maia, S. M. C. 2004. Estudo integrado geológico-tecnológico de rochas ornamentais: os granitos Flores e Jacarandá, RN. Dissertação de Mestrado, PPGG-UFRN, 75p.
- Maia, S. M. C.; Galindo, A.C.; Torquato, J.R.F.; Torquato, M.F.B. 2006. Caracterização tecnológica do granito ornamental Vermelho Flores, Rio Grande do Norte, Brasil. *Estudos Geológicos*, 16 (2): 41-54.
- Nachit, H.; Razafimahefa, N.; Stussi, J.M.; Carron, J.P. 1985. Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoides. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 301: 813-818.
- Nachit, H. 1986. Contribution à l'étude analytique et expérimentale des biotites des granitoides. Applications typologiques. Université de Bretagne Occidentale, Tese de Doutorado, 181p.
- Nachit, H.; Ibhi, A.; Abia, E.H.; Ohoud, M.B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated and neofomed biotites. *C.R. Geoscience*, 337:1415-1420.
- Nakada, S. 1991. Magmatic processes in titanite-bearing dacites, central Andes of Chile and Bolívia. *American Mineralogist*, 76:548-560.
- Nascimento, M.A.L.; Antunes, A.F.; Galindo, A.C.; Jardim de Sá E.F.; Souza, Z.S. 2000. Geochemical signatures of the Brasiliano-age plutonism in the Seridó belt, Northeastern Borboerema Province (NE Brazil). *Rev. Bras. Geoc.*, 30: 161-164.
- Nascimento, M.A.L.; Medeiros, V.C.; Galindo, A.C. 2008. Magmatismo Ediacarano a Cambriano no Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema, NE do Brasil. *Estudos Geológicos*, 18 (1): 4-29.
- Speer, J.A. - 1984 - Micas in igneous rocks. *In: BAILEY, S.W., ed. Reviews in Mineralogy*. Blacksburg, Mineralogical Society of America, v.13, p.299-356.
- Tulloch, A.J. 1979 Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69:105-117.
- Wones, D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *Am. Mineral.*, 74: 744-749.